

# 基于导纳测量方法的发电机失磁保护 ——极为贴近发电机的运行极限图

Dr. Hans-Joachim Herrmann<sup>1</sup> 高迪军<sup>2</sup>

(1 西门子股份公司输配电集团能源自动化部, 德国纽伦堡;  
2 西门子电力自动化有限公司产品经理, 南京 211100)

**【摘要】**本篇文章将关注发电机的失磁保护，并且介绍用于失磁保护的导纳测量技术。这其中包含了相关的理论基础知识，以便于更加清晰地描述失磁特征。发电机的导纳特性源于其稳定极限，文中描述了如何从发电机的运行极限图变换得到导纳特性，然后对导纳测量和阻抗测量进行比较。介绍完“导纳测量技术”和典型的保护特性以后，再介绍一些实际应用。这些应用实例集中在如何整定失磁保护的定值，文中还以图解的方式示出了如何将现有保护中的阻抗定值转换为导纳定值。

**【关键词】**发电机保护 微机保护 失磁 静态稳定 阻抗测量 导纳测量

## 1. 介绍

导致发电机部分失磁或者完全失磁的原因很多，包括励磁回路的短路、灭磁开关跳开、自动电压调节器错误动作、错误地控制发电机和变压器以及发电机带容性负载运行等。在本篇文章中，失磁指的是同步电机的励磁，小于特定功率水平下同步电机稳定运行所需要的励磁值，这里的励磁极限决定了发电机的静态稳定性。如果励磁系统不能满足发电机所需的无功需求，那么发电机就会超出稳定极限。同步电机产生滑差，并且从系统中吸收无功。

根据发电机的结构、励磁系统的类型、系统工况、原动机功率的大小以及电压和功率调节器 (AGC) 作用的不同，在发电机失磁时可能会导致转子加速、转子和定子局部过热、转子过电压、对基础部分产生机械应力以及系统振荡等。为了阻止，或者至少是限制这些有害作用的持续时间，就需要配置失磁保护，来检测（失磁）故障产生的原因并且快速地跳开发电机。

失磁保护可以采用不同的原理和判据。阻抗测量的方法 [文献 1, 2]，就是一种广泛应用的测量原理。失磁保护之所以选择阻抗测量方法，无外乎是因为阻抗测量方法在机电式继电器中已经广泛采用并且很成功。但是，大约在 35 年以前，西门子公司却走了一条不同的路线 [文献 3, 4]。这是一种全新的失磁保护解决方案。一方面，失磁保护的动作特性可以直接从发电机的运行极限图上获得。另一方面，失磁保护的动作特性与发电机机端电压的波动无关。这种原理的失磁保护需要将发电机的运行极限图变换到导纳平面，并且评估发电机的导纳测量值。

## 2. 发电机运行极限图

为了方便下面的论述，在这里对一些基本的电气量做相应的定义：

- 符号约定： 输出功率( $P, Q > 0$ )为正值
- 视在功率： 符号 **S**, 单位 **VA** (**kVA, MVA**)
- 有功功率： 符号 **P**, 单位 **W** (**kW, MW**)
- 无功功率： 符号 **Q**, 单位 **Var** (**kVar, MVar**)
- 如果采用 **标么值** (p.u.), 那么要用到额定视在功率  $S_N$ 、额定电压  $V_N$ 、额定电流  $I_N$  等发电机的铭牌数据进行相应的转换计算。

根据笛卡尔坐标系的定义 ( $x$ -轴 = 实部分量,  $y$ -轴 = 虚部分量)，第一象限为发电机的运行范围 ( $P > 0$  以及  $Q > 0$ )。在欠励磁的工况下，发电机运行在第四象限 ( $P > 0$  以及  $Q < 0$ )。如果用图形的方法来描述失磁保护的话，失磁区域应该位于第四象限。为了视图的方便，通常将发电机运行极限图按照坐标原点做镜像处理，将第四象限旋转到左边。本文中以后的相关描述都采用这种视图方法。

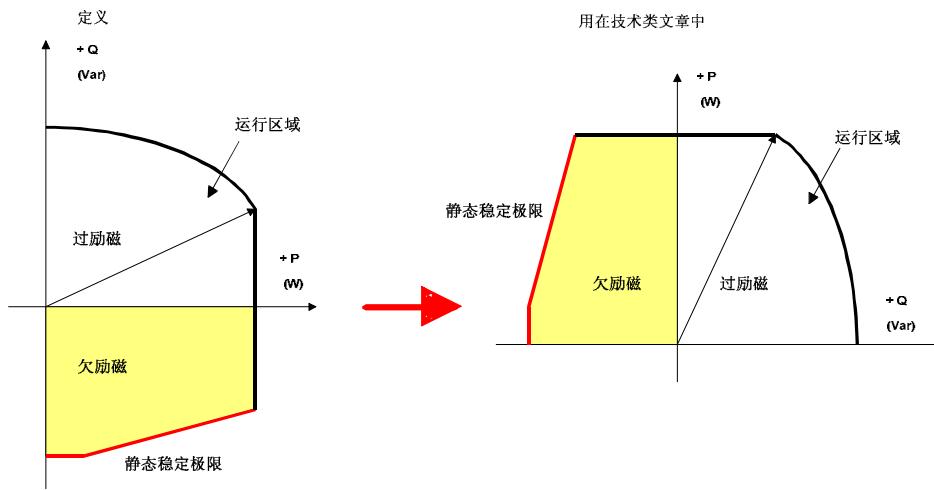


图 1：发电机运行极限图的不同视图方法

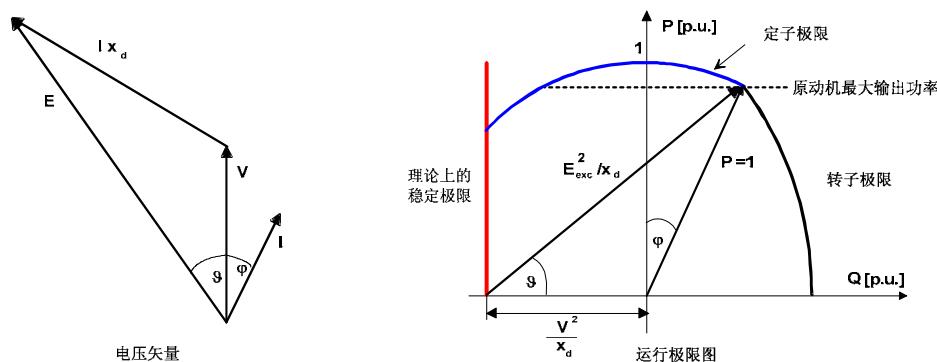
静态稳定极限来自于发电机的有功功率和无功功率计算公式 [文献 5, 6]。公式 (1) 和公式 (2) 是发电机输出功率的通用计算公式，可以用来直接计算凸极式发电机，这是考虑到凸极式发电机的直轴电抗参数和交轴电抗参数不同。由于  $x_d$  和  $x_q$  不相等，从而形成一个直径为  $V^2 \frac{x_d - x_q}{x_d x_q}$  的圆。这个圆表示的是不加励磁 ( $E = 0$ ) 时，发电机能够发出的稳态功率。

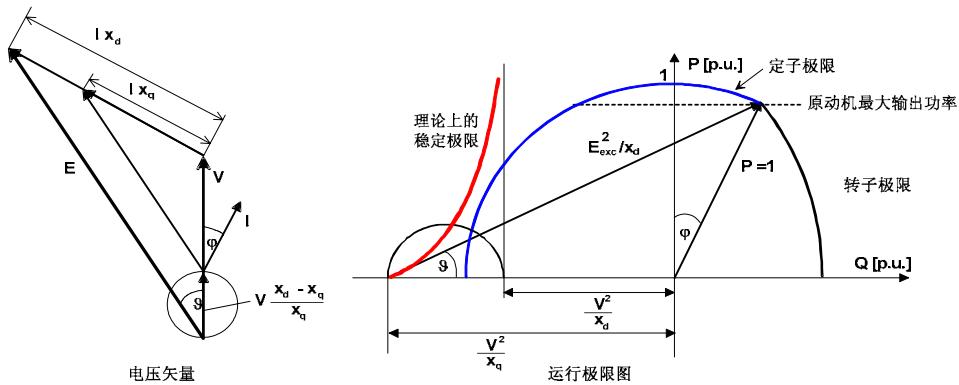
$$P = \frac{EV}{x_d} \sin \vartheta + \frac{V^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \sin 2\vartheta \quad (1)$$

$$Q = \frac{EV}{x_d} \cos \vartheta - \frac{V^2}{x_d} \left(1 + \frac{x_d - x_q}{x_q} \sin^2 \vartheta\right) \quad (2)$$

这里：  
 $E$  定子绕组电动势 p.u.  
 $V$  发电机机端电压 p.u.  
 $x_d$  直轴同步电抗 p.u.  
 $x_q$  交轴同步电抗 p.u.  
 $\vartheta$  功角

对于隐极式发电机，由于直轴同步电抗  $x_d$  和交轴同步电抗  $x_q$  几乎相等，因此公式 (1) 和 (2) 得到简化。理论上的静态稳定极限功角  $\vartheta = 90^\circ$ 。相应地，由发电机运行极限图变换而来的稳定极限值通过直轴同步电抗  $x_d$  给出。而对于凸极式发电机，这个稳定极限值与直轴同步电抗  $x_d$ 、交轴同步电抗  $x_q$ 、励磁系统以及机端电压都有关系。 $Q$ -轴上的理论极限值取决于交轴同步电抗  $x_q$ 。允许的功角  $\vartheta$  小于  $90^\circ$ 。在图 2 和图 3 中，通过电流和电压的矢量图及发电机的运行极限图，将两种类型发电机的这些极限值都标示了出来。

图 2：隐极式发电机 ( $x_d = x_q$ ) 的矢量图和运行极限图 ( $E_{exc}$ : 定子绕组电动势;  $I$ : 定子电流)

图 3：凸极式发电机 ( $x_d \neq x_q$ ) 的矢量图和运行极限图

从以上图示可以看出，发电机的运行范围受到了约束：

在 **过励磁区域**：

受原动机输入功率的约束和励磁绕组温升的约束（转子值）。

以及

在 **欠励磁区域**：

受原动机输入功率的约束、定子端部温升的约束以及稳定极限的约束。

发电机接入电力系统以后，发电机的真实（实际）稳定极限就会发生变化。这时候，要考虑到发电机和系统之间的联系电抗（如，升压变压器的电抗）等，还要考虑适当的安全裕度，发电机实际允许的稳定极限值将小于理论值。发电机制造厂家在规定稳定极限值时，必须配合运行极限图。在图 1 中，可以看到视图方法不同，坐标轴的标定方式也不一样。这其中采用有名值 (MW, MVar) 的标定方式，也有采用标幺值的标定方式 (p.u.)，而优先选择标幺值的标定方式。如果将有名值视图上的各参数除以发电机的额定视在功率，就可以得到标幺值视图。

下面的图 4 和图 5 分别是隐极式发电机和凸极式发电机的运行极限图实例。

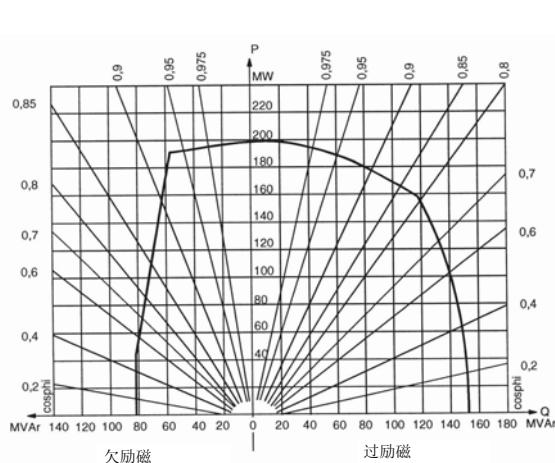


图 4：隐极式发电机的运行极限图

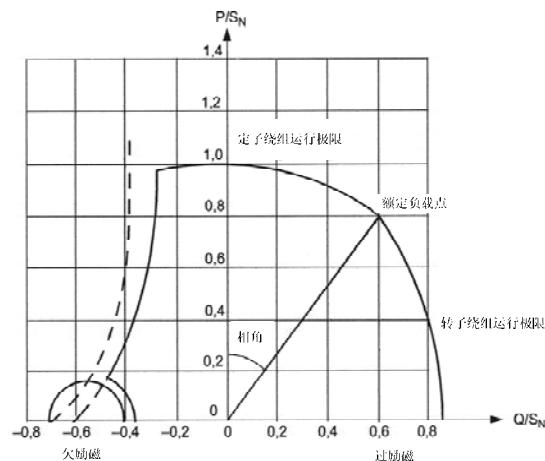


图 5：凸极式发电机的运行极限图

考虑到发电机与系统的联系电抗，相比于理论上的稳定极限特性，隐极式发电机的实际稳定极限将向坐标轴的右边倾斜。但是对于凸极式发电机，理论上的稳定极限图将整体移向坐标轴的右边。其与无功轴的交点大致位于圆中心 [文献 5]。

运行极限图适用于发电机处于额定电压 ( $V_N$ ) 和额定电流 ( $I_N$ ) 的工况。在实际运行中，却并不能保证电压值为常量。通过下面的计算公式，可以看出电压变化对发电机运行极限的影响。通过图解的方法，可以看出隐极式发电机理论上的稳定极限图（请参考图 2）在电压改变 10% 时的影响 [文献 7]。

如果不加励磁，那么定子绕组电动势  $E=0$ 。发电机吸收的最大无功功率为  $Q = -V^2/x_d$ ，电压变化 10% 时，无功功率有以下变化：

$$\text{At } V = 0.9: Q = -\frac{V^2}{x_d} = -\frac{0.9^2}{x_d} = -\frac{0.81}{x_d}$$

$$\text{At } V = 1.1: Q = -\frac{V^2}{x_d} = -\frac{1.1^2}{x_d} = -\frac{1.21}{x_d}$$

与额定电压时相比，在低电压时发电机的稳定极限移向右边，进一步约束了发电机能够吸收的系统无功功率。这个无功功率与电压的平方成正比。在过电压时，发电机的稳定极限移向左边，因此不用关心。

前面阐述的静态稳定，主要论述了系统中发生的小干扰对发电机稳定极限的影响。如果系统的负荷或者运行方式突然发生变化，那么就会出现相应的暂态量及相应的暂态反应。这时候，就涉及到发电机的动态稳定性问题。为了得到简化的近似结果，可以用暂态量 ( $x'_d$ ,  $x'_q$  和  $E'$ ) 替换公式 (1) 和 (2) 中的相关量 [文献 5]。图 6 示出了动态稳定的基本结果。在这个过程中，假设发电机的暂态交轴电抗等于同步交轴电抗。从图上可以看出，在动态过程中即使功角大于  $90^\circ$ ，发电机依然能保持稳定。如果对隐极式发电机加以分析，也可以得出类似的结论。在这种情况下，发电机的动态稳定极限取决于暂态直轴电抗。在实际运行中，功角也大于  $90^\circ$ ，一般在  $110^\circ$  到  $120^\circ$  之间。

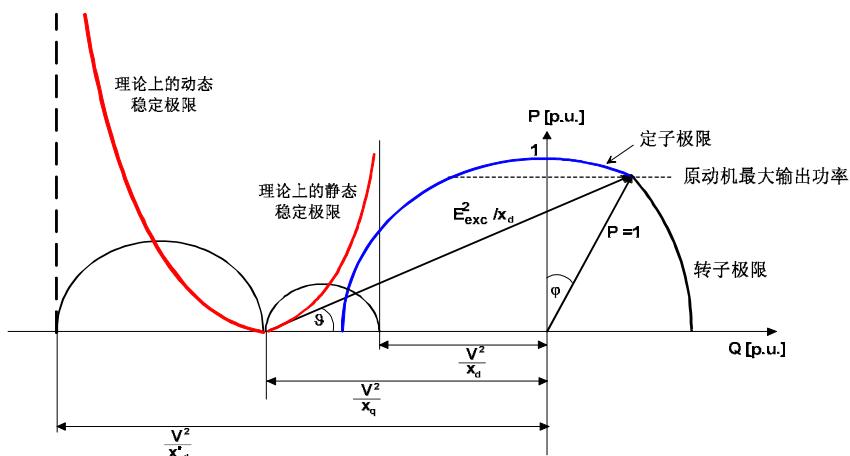


图 6: 动态稳定极限 (凸极式发电机)

在图 7 中，对发电机失磁状态下的各种稳定极限作了总结，即：

- (稳态) 运行中的发电机稳定极限位于理论上的稳定极限右边，由发电机的运行极限图给定。它对应于额定电压的工况。
- 如果发电机机端电压  $V < V_N$ ，那么稳定极限将向右移动。
- 考虑到发电机运行中出现的动态工况，引入了发电机的动态稳定极限。如果动态稳定极限超出，那么必须立即将发电机从系统中解列开来。因为此时，发电机很有可能发生滑极。

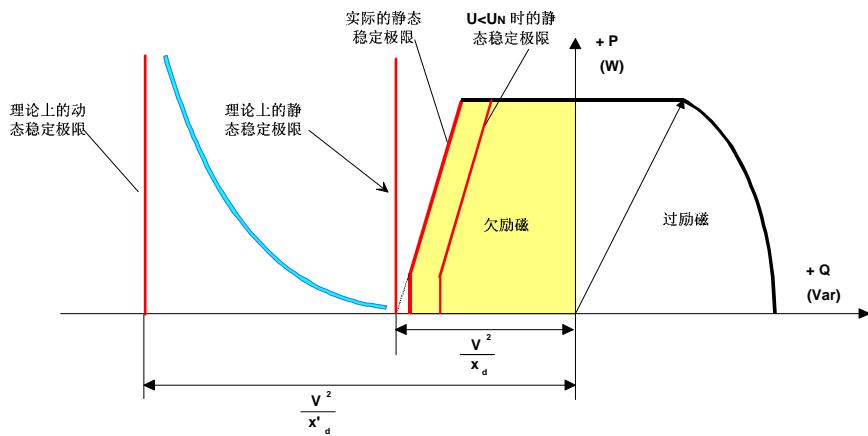
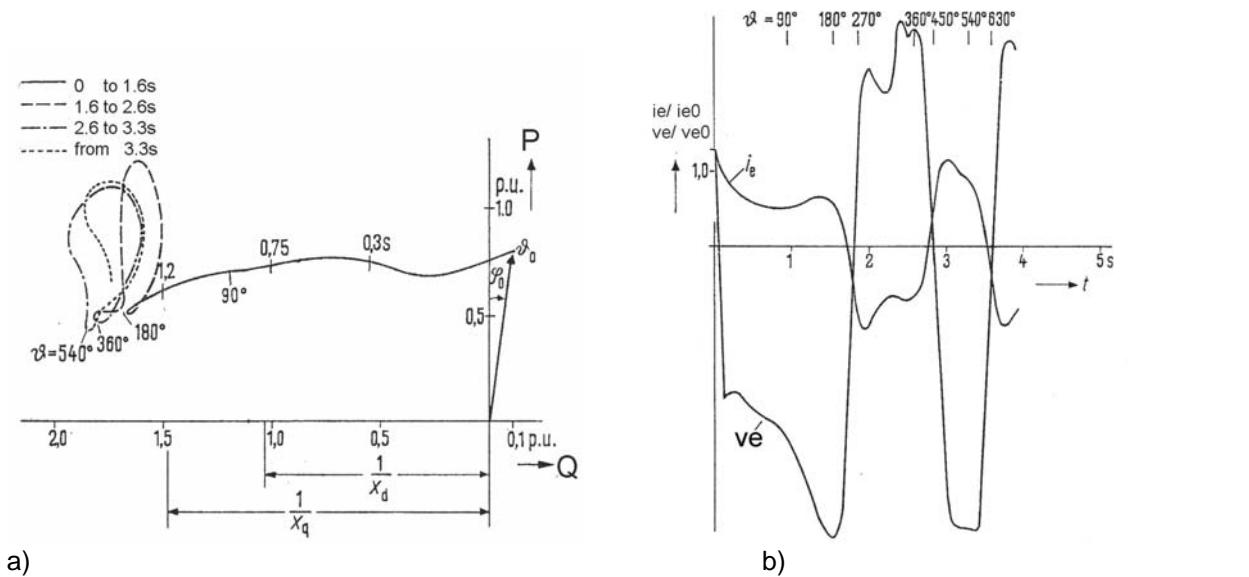


图 7：总结发电机的稳定极限

图 8 中示出了一台凸极式发电机失去同步的过程 [文献 3]。从曲线上可以清楚地看到，发电机失磁以后转子功角一直在增大。由于原动机的输入功率不能立即发生改变，因此发电机输出的有功功率基本保持不变，而发电机从系统吸收的无功功率却在不断地增加，最终突破了发电机的静态稳定极限。发电机的转速不断加快产生滑差，滑差的产生又导致在励磁绕组中产生附加的磁通或附加的转子感应电动势，以试图将转子的电枢反应维持在某个常数。从图 8 中可以看出，在功角处于  $90^\circ$  到  $180^\circ$  之间时，励磁电流再次明显增加。只是在靠近  $180^\circ$  前的短时间内，转子向定子磁极方向加速。转子加速显著，导致滑差迅速增加，阻尼绕组的作用力也增加明显。当  $\theta = 180^\circ$  时，磁场发生改变，定子绕组电动势（测量不到）接近于零。由于转子回路是一个大的电感回路，因此励磁电流过零点和测量到的定子绕组电动势都有延时。这时，由于  $\theta > 180^\circ$  之后的短时间内同步扭矩变得很大，因此转子开始减速直到接近于同步转速。结果将导致产生很强的扭矩脉冲，从曲线（图 8a）上可以明显地看出有功功率脉冲的存在。由于驱动发电机的机械功率很大，因而同步电机无法恢复稳定状态，电机将继续滑极。在  $\theta = 180^\circ$  到  $360^\circ$  以及  $n \cdot 180^\circ$  到  $(n+1) \cdot 180^\circ$  的范围内，这个过程不断重复。在达到稳定滑极前的暂态过程中，参数在变动。第一个扭矩脉冲之后的无功功率最小值与随后的振荡周期中无功功率的最小值不同。由于凸极式发电机的直轴电抗和交轴电抗不同，这个振荡和暂态的过程尤为严重。在一个周波之内，滑差剧烈变化。

图 8：一台 30 MVA 凸极式发电机的失步过程（由快速失去励磁引起），其中  $P=0.8$ ,  $i_e=1.3 i_{e0}$  [文献 3]

[ a) 潮流曲线      b) 励磁信号 ( $i_e$  = 励磁电流,  $i_{e0}$  = 空载额定励磁电流,  $v_e$  = 励磁电压,  $v_{e0}$  = 空载额定励磁电压) ]

### 3. 导纳测量原理

在前面的介绍部分提到过，将发电机的运行极限图变换到以标幺值表示的导纳平面上有着独特的优势。它不但直接对应发电机的运行极限图，而且还与发电机的机端电压无关。

通过以下公式介绍变换过程。

公式(3)和公式(4)是对复功率和复导纳的基本定义：

$$\underline{S} = \underline{V} * \underline{I}^* \quad \underline{S} = P + jQ \quad (3)$$

$$\underline{Y} = \frac{\underline{I}}{\underline{V}} \quad \underline{Y} = G + jB \quad (4)$$

其中：  
 $\underline{Y}$  导纳  
 $G$  电导（导纳的实部）  
 $B$  电纳（导纳的虚部）

在公式(4)中，分子和分母分别乘以电压的共轭向量，就可以得出相应的变换关系：

$$\underline{Y} = \frac{\underline{I} \cdot \underline{V}^*}{\underline{V} \cdot \underline{V}^*} = \frac{\underline{S}^*}{\underline{V}^2} = \frac{P - jQ}{\underline{V}^2} = \frac{P}{\underline{V}^2} - j \frac{Q}{\underline{V}^2} \quad (5)$$

对比公式(4)和公式(5)的相应系数，可以得出以下导纳参数：

$$G = \frac{P}{\underline{V}^2} \quad B = -\frac{Q}{\underline{V}^2} \quad (6)$$

在发电机运行极限图上的数据只需要简单地除以电压的平方，接着将虚部参数的符号反向，变换过程就结束了。当发电机机端电压  $V = V_N = 1$  时，在运行极限图上的标幺值参数就等于导纳图上的标幺值参数（见图9）。因此，可以从发电机的运行极限图上直接获取失磁保护的定值参数。

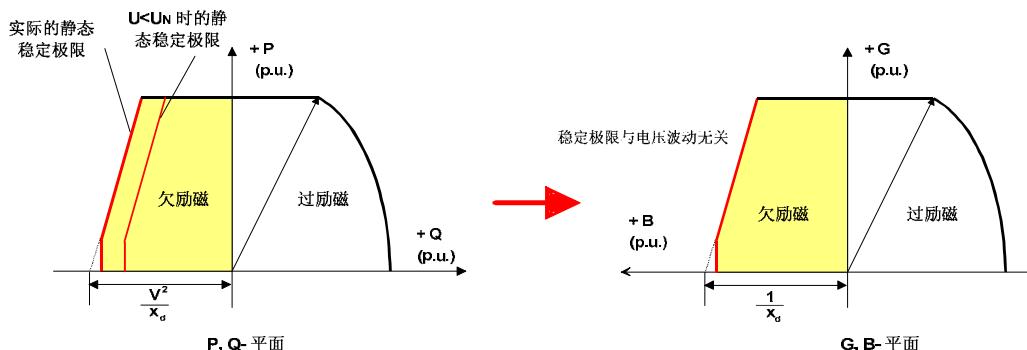


图 9：发电机的运行极限图和导纳图

保护测量算法的基础是公式(3)和公式(6)。保护装置通过瞬时值采样得到发电机的三相对地电压和三相电流的矢量，然后从这些矢量数据中计算出电流和电压的正序分量。按照公式(3)中的定义，采用电压和电流的正序分量计算出发电机的有功功率和无功功率。然后按照公式(6)，除以正序电压  $V_1$  的平方，就将功率平面转换到了导纳平面。

从图7，可以直接得出失磁保护所需的特性参数。图中给出的静态稳定极限是必须监视的，通常，两条直线就足够了。另外，还设有一个动态稳定极限的门槛值。在深度欠励磁运行区域（特性3左边的部分），发电机已经没有可能再拉回同步了。所以，此时要求立即跳闸。它与超出静态稳定极限（图10中的特性1和特性2）时的状况是不一样的。如果是后者，只要励磁电压足够强，就完全有可能将发电机拉回同步运行。因此，监视励磁电压 ( $V_{exc} <$ ) 就可以作为失磁保护的辅助判据。这个辅助判据控制着特性1和特性2的跳闸时间。通过这种方式，当发电机恢复静态稳定工况后发生动态脉冲信号入侵静态稳定极限造成暂态穿越时，可以有效防止失磁保护误动作。

要整定这些特性曲线，只需要整定直线与 **B**-轴的交点也就是基准点以及直线的倾角。直线的倾角可以直接从发电机运行极限图上获取（也请见第 5 部分）。整定出来的特性曲线应该尽量靠近给定的发电机稳定特性曲线。然后，再考虑励磁回路控制装置的特性。

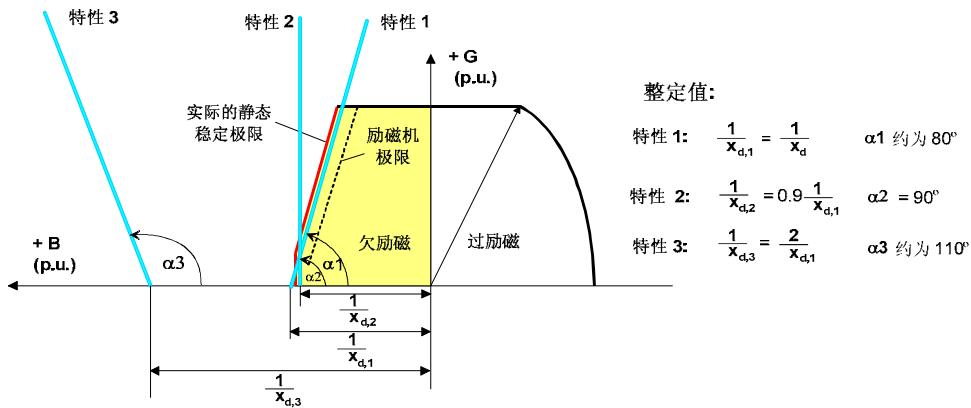


图 10：导纳特性的失磁保护特性曲线 (隐极式发电机) [文献 8]

(对于凸极式发电机，特性 1 定值等于  $1/x_d + 1/2 * (1/x_q - 1/x_d)$  左右，特性 2 定值等于  $1/x_d$  左右，倾角  $\alpha_2 = 100^\circ$ )

从图 10 可以看出失磁保护的动作特性：

- 超出了特性 1, 2，励磁电压监视功能 ( $V_{exc} <$ ) 没有启动  
这种情况下必须要发信告警，跳闸命令要设定长延时 (**10 s** 左右)
- 超出了特性 1, 2，励磁电压监视功能 ( $V_{exc} <$ ) 也已经启动  
这种情况下，跳闸命令要设定短延时 (**0.5 s** 至 **1.5s** 之间)
- 超出了特性 3  
这种情况下，跳闸命令可以设定短延时 (**< 0.3 s**)，或者不设延时

#### 4. 对比阻抗测量方法

在前面的介绍部分提到过，阻抗测量方法广为应用 [文献 1, 2]。为了获得阻抗原理的定值参数，必须要将发电机的运行极限图变换（映射）到阻抗平面。其中的数学变换采用轨迹的倒数。但是这样变换产生的结果，就是无法直观地对比运行极限图。根据轨迹论（刚好不过原点的直线经过倒数变换成为圆时，与原点相切），将理论上的稳定极限变换到阻抗平面后，得到一个圆。变换机制显示在图 11 中。运行极限图上稳定极限左边的所有点，经过变换后都位于阻抗平面上的半圆（阴影区域）内。.

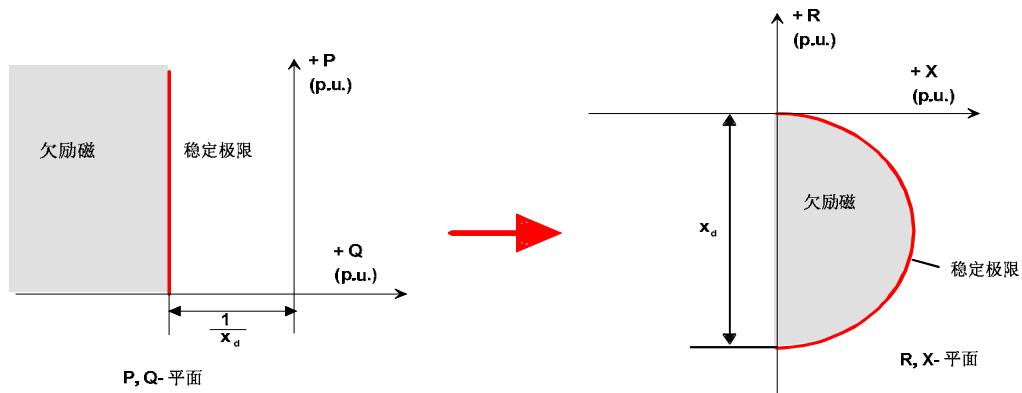


图 11：变换到阻抗平面

反过来，根据 IEEE [文献 1] 定义的阻抗原理失磁保护特性也可以转换成以标幺值表示的发电机运行极限图。这里，必须要遵循以下规律：不过原点的圆，倒数变换后仍然是个圆。图 12 示出了变换过程。可以看出，与导纳原理（见图 10）相比，阻抗原理的失磁保护动作特性只是对发电机稳定极限的初略近似。当发电机制造厂家提供的稳定极限被连续轻微地超出以后，这种测量原理是无法探测出来的。必须依赖于控制系统（低励控制器）或者运行人员来检测这种故障。还有一种方法，就是配置另外的监视功能（如，附加阻抗圆）。这里介绍一个实例：中国四川的二滩水电站采用阻抗原理的失磁保护，就曾经发生了灭磁开关偷跳两次而失磁保护均拒动的情况，其中一次被迫由运行人员手动切除发电机出口开关。事后分析认为，失磁后的机端阻抗轨迹不进入动作圆或者进去后很快又出来是造成失磁保护拒动的原因 [文献 9]。

但是，阻抗原理也有优点，那就是在动态（稳态特性下的暂态穿越）情况下具有较大的安全裕度。在发生这样的突然事件时，不会引起保护启动，或者仅仅是暂态启动。图 12 示出了特征点的变换过程和变换规则。

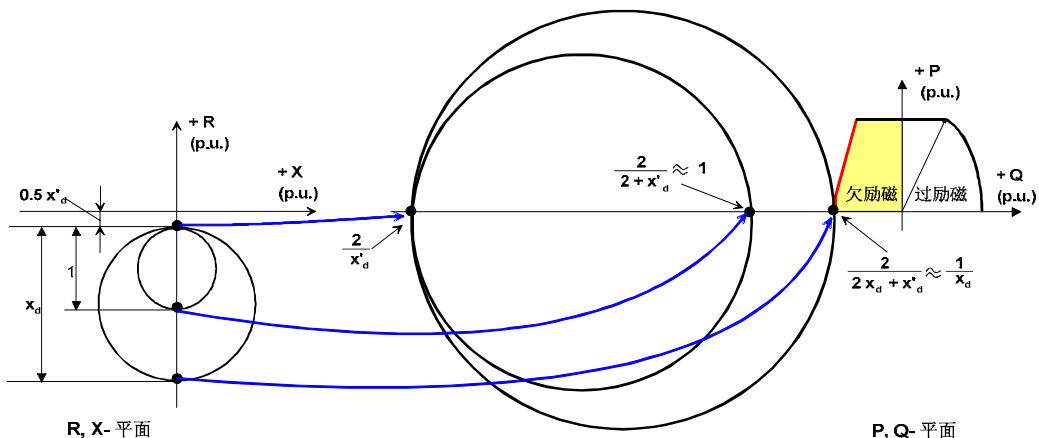


图 12：从 IEEE 定义的失磁保护阻抗特性变换到稳定极限图

图 13 示出了某隐极式发电机的失磁保护，分别采用阻抗原理和导纳原理整定的特性对比结果。为了便于观察，保护的定值均采用了推荐的典型值（参考图 10 和图 12）。可以看到，在发生失磁时，由于导纳原理本身可以更精确地逼近静态稳定特性，所以相对于阻抗原理来说会更早地发出告警信号。这可以从显示的失磁轨迹上看出。从图 13 也可以看出，这两种测量原理大体上相近。最为明显的区别就是，定值完全不一样。

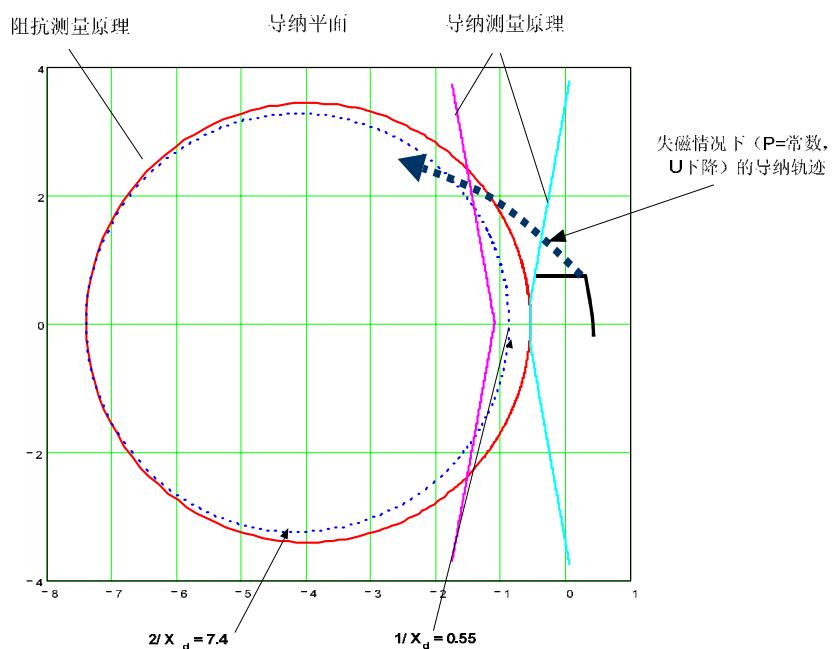


图 13：阻抗原理与导纳原理的特性曲线对比，标幺值-运行极限图( $x_d = 1.81$ ;  $x'_d = 0.27$ )

## 5. 应用

在这个部分，最为关心的问题应该是：如何整定导纳原理的失磁保护定值？

其实，这个问题的答案在第 2 到第 4 部分已经基本给出了。根据不同的原始数据，获得定值的方法也不一样：

- a) 如果已知发电机的运行极限图，那么定值可以直接从图上取得保护定值（要求是标幺值）。特性 3 的定值则可以参照图 10 来整定。
- b) 如果已知发电机的同步直轴电抗，那么保护定值可以参照图 10 来直接整定。对于特性直线的倾角，必须采用图上标明的参数。这些推荐定值都是参考 IEEE 的推荐值 [文献 1]。
- c) 如果是发电机保护改造换型，那么原来整定的阻抗定值当然也是可以转换到导纳定值的。假定定值都是二次值，那么通过下面的公式转换为标幺值：

$$\frac{1}{X_{d,sec}} = \frac{V_{N,Sec}}{\sqrt{3} I_{N,Sec} \cdot X_{old,Setting}} \quad (7)$$

其中：  
 $V_{N,Sec}$  二次额定电压 (e.g. 120V)  
 $I_{N,Sec}$  二次额定电流 (e.g. 5A)  
 $X_{old,Setting}$  原来的阻抗参数 (欧姆)

在图 14 示出了一个变换的实例。图上左边部分显示的是被更换的失磁保护特性和可能的参数，右边部分显示的是转换为导纳原理的微机失磁保护后的定值单。通过变换公式 (7)，原来的电抗有名值转换为标幺值。另外，没有使用励磁电压监视功能。图 10 中的三条特性曲线分别应用在新的定值表中。特性 1 用于告警段，倾角整定为 80°，能够很好地接近稳定极限。这段特性的跳闸延时整定为 10 s。特性 2 去模拟原来失磁保护的阻抗大圆，跳闸命令带有短延时。变换到特性 2 后的保护定值为 0.51，延时参数整定为 1 s。为了更好地接近阻抗圆，特性稍微向左移动了一点（参考图 13）。倾角整定为 100°。

特性 3 对应于原来失磁保护特性的内部小圆。

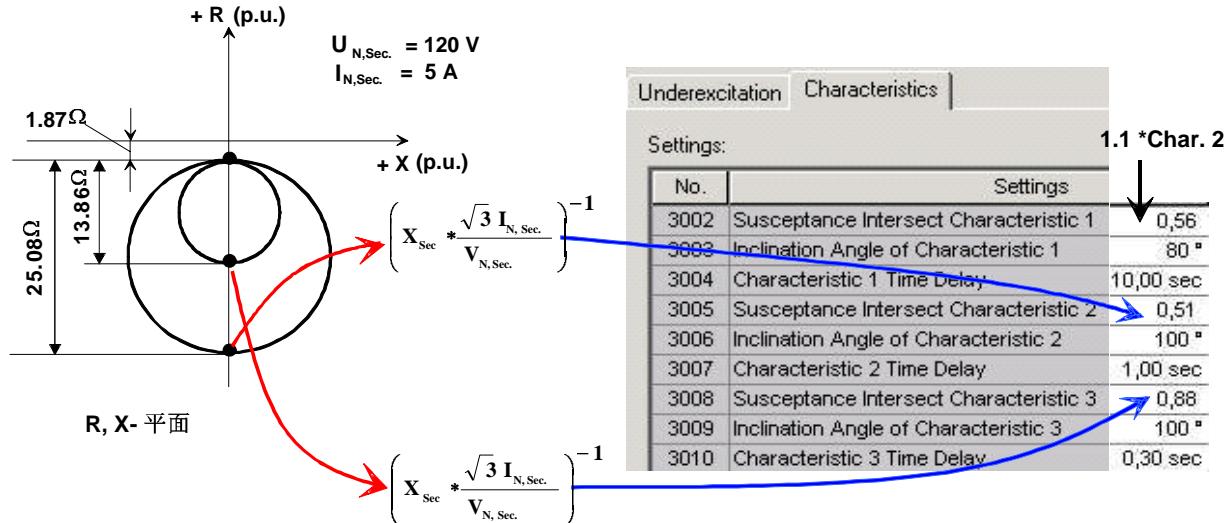


图 14：变换示例：从阻抗定值到导纳定值

## 6. 总结

静态稳定极限由发电机制造厂家给出。导纳测量的方法，可以去很好地接近这些极限值。导纳测量还正确地考虑到了机端电压对发电机运行极限范围的影响。

文中论述了两种基本类型的发电机，即隐极式发电机和凸极式发电机的失磁过程，还探讨了静态稳定极限的基础以及影响因素。接着，介绍了如何将发电机的运行极限图变换到导纳平面，介绍了导纳测量技术及其在失磁保护中的应用。另外，还阐述了导纳测量技术和阻抗测量技术的差异以及如何将发电机的运行极限图变换到阻抗平面。“应用”部分专门介绍定值的计算，并且提供了不同的解决方案。采用数字技术以后，测试的内容就减到最少了。

## 参考文献:

- [1] IEEE Guide for AC Generator Protection. IEEE Std. C37.102 – 1995, Approved 12 December 1995, ISBN 1-55937-711-9
- [2] IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators. (1995) IEEE Catalogue Number: 95 TP 102
- [3] Fischer, A., Zurowski, E: „Neuartiger Untererregungsschutz“ (New type of under-excitation protection\*) Siemens magazine , (1966) paper.8, p. 634 – 640
- [4] Untererregungsschutz (under-excitation protection\*) RG66, product pamphlet of Siemens, 1967
- [5] Bonfert,K : Betriebsverhalten der Synchronmaschine (synchronous machine operational response\*). Berlin, Göttingen, Heidelberg, Springer-Verlag 1962
- [6] Weßnigk, K.-D.: Kraftwerkselekrotechnik (power station electronics\*). vde verlag gmbh, Berlin, Offenbach 1993, ISBN 3-8007-1724-7
- [7] Born,E.; Fischer, A.:Elektronischer Untererregungsschutz (electronic under-excitation protection\*). Siemens-magazine. (1972) paper.12; p. 912 –915
- [8] Multifunction Generator, Motor and Transformer Protection Relay 7UM62. (2001) Siemens Manual, order No. C53000-G1176-C149-1
- [9] 王强 二滩水电厂发-变组微机保护运行情况分析

\* 这些文献只有德文版本

---

## 作者简介

**Dr. Hans-Joachim Herrmann**, 生于 1952 年, 1977 年毕业于德累斯顿技术大学, 已经有 29 年从事继电保护的经验。1977 年至 1991 年之间, 在 Zittau 技术大学任助理教授。1991 年加入西门子子公司, 是西门子输配电集团能源自动化部门保护产品的管理层成员。截至目前, 共发表过 60 左右的论文。主要著作有俄文版《继电保护》和德文版《微机保护》等。

**高迪军**, 生于 1975 年, 已经有 8 年从事继电保护的经验。2004 年加入西门子电力自动化有限公司, 从事发电机-变压器保护的技术应用和支持。

---